

力センサを用いない複数移動ロボットによる物体の協調搬送*

久米 洋平*¹, 平田 泰久*¹, 小菅 一弘*¹
浅間 一*², 嘉悦 早人*², 川端 邦明*²Coordinated Transportation of an Object
by Multiple Mobile Robots without Using Force/Torque SensorsYouhei KUME*³, Yasuhisa HIRATA, Kazuhiro KOSUGE,
Hajime ASAMA, Hayato KAETSU and Kuniaki KAWABATA*³ Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Tohoku University,
01 Aoba-yama, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

In this paper, we propose a decentralized control algorithm of multiple mobile robots transporting an object in coordination without using force/torque sensors. In this algorithm, each robot is controlled as if it has a specified impedance dynamics, using the identified parameters of each robot, without using a force/torque sensor. These robots transport a object in coordination using a leader-follower type control algorithm. We also consider the effect of parameter identification errors and propose a method to reduce the effect of them. The proposed control algorithm is experimentally applied to two mobile robots, and the experimental results illustrate the validity of the proposed control algorithm.

Key Words: Robot, Moving Robot, Sensor, Impedance Control, Coordinated Motion Control

1. 緒 言

人は大きな物体や重い物体を搬送しようとする時、何人かで力を合わせて搬送作業を行う。これは、物体を持つ人数が増えると、各自の負担が軽くなり、一人では搬送できないような大きな物体や重い物体を搬送することができるからである。ロボットについても同様のことが考えられ、図1に示すように複数のロボットが協調して物体を搬送することにより、1台では搬送できないような大きな物体や重い物体を搬送することができる。このように複数のロボットを協調させることにより、システム全体での可搬重量を大きくし、ロボット1台当りの負担を軽くすることができる。また複数のロボットと物体が閉リンク機構を構成するため、システム全体の機械的剛性を高めることができ、安定した作業が可能となる。

近年、複数のロボットを用いた物体の操り問題に関しては、様々な研究が行われてきた^{(1)~(4)}etc. 一般に、複数のロボットを協調させて物体を搬送する場合、各ロボットには力学的干渉が伴うため、物体を把持す

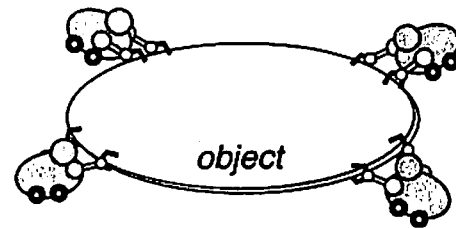


Fig. 1 Handling an object by multiple robots

る部分に力センサを搭載し、物体に加わる力に基づいて、各ロボットを制御する。しかし、大きな物体や重い物体を搬送すると、過大な力が働いてしまい力センサを壊してしまう恐れがある。また、移動ロボットは、車輪部に路面の凹凸を吸収するためのサスペンション機構を持っているため、ロボットの剛性はそれほど高くない。従って、ロボットのボディーが剛体からなるという仮定に基づいて制御系を設計すると、駆動系とセンサとの間に考慮していない動特性が現れ、場合によっては制御系が不安定になることが知られている。この問題を解決する一つの方法として、駆動系とセンサを同じ場所に置くことが有効であることが知られている⁽⁵⁾。これをアクチュエータとセンサの Collocation という⁽⁶⁾。

* 原稿受付 2001年9月3日。

¹ 東北大学大学院工学研究科(☎980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)。² 理化学研究所生化学システム研究室(☎351-0198 和光市広沢2-1)。

E-mail: hirata@irs.mech.tohoku.ac.jp

そこで本論文では、力センサを用いずにエンコーダの情報だけを用いて、複数台のホロノミックな移動ロボットによる単一物体を搬送するための協調制御アルゴリズムを提案する。この制御系では、力センサを用いないため、力センサの定格荷重を考慮することなく重量物体を搬送することができる。また、アクチュエータとして車輪のモータを、センサとして車輪のエンコーダを用いるため、アクチュエータとセンサを同じ場所に置くことができ、アクチュエータとセンサの Collocation を実現することができる。

以下本論文では、最初に複数のロボットを協調制御するための分散協調制御アルゴリズムについて説明し、次にそのアルゴリズムの中で用いられているインピーダンス制御を力センサを用いずに実現する方法について説明する。また、各ロボットのパラメータ同定に誤差があった場合、それが各ロボットの運動にどのように影響するかについて考え、その影響を低減する方法について説明する。最後に、提案したアルゴリズムを2台の全方向移動ロボットに適用し、搬送実験を行うことにより、その有効性を示す。

2. ロボットの制御系の設計

本節では、複数の分散制御されたホロノミックな移動ロボットにより単一物体を搬送する問題について考える。

2.1 協調制御アルゴリズム 著者らはリーダー・フォロワタイプの分散協調制御アルゴリズムを提案してきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。これらのアルゴリズムでは、物体の目標軌道はリーダーと呼ばれるロボットに与えられ、フォロワと呼ばれる残りのロボットは、リーダーに与えられた物体の目標軌道を推定し、リーダーと協調して物体を搬送するというものである。

しかしながら、これらのアルゴリズムでは速度サーボ系の利用を前提として制御系を構成しているため、そのままではダイナミクスを利用を前提とした力センサを用いない制御系を構成できない。そこで本小節では、各ロボットのダイナミクスを考慮した、リーダー・フォロワタイプの分散協調制御アルゴリズムを提案する。

まず、ロボット間に多少の運動誤差が生じてもその影響を吸収できるように、各ロボットを物体の把持点回りに非干渉化されたインピーダンス特性を持つように、次式の特性を満たすように制御することを考える。(図2)

$$M_k \Delta \ddot{X}_k + D_0 \Delta \dot{X}_k + K_0 \Delta X_k = F_k^e - F_k^{in} \quad (1)$$

ただし、添字 $k = l, i$ はそれぞれ、リーダーおよび i

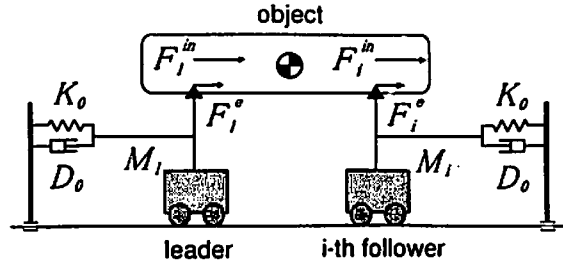


Fig. 2 Impedance-control

番目のフォロワを表す ($i = 1, \dots, n$)。また以下、すべての変数は絶対座標系から定義したものとする。 $M_k = \begin{bmatrix} M'_k & 0 \\ 0 & M''_k \end{bmatrix}$, $D_0 = \begin{bmatrix} D'_0 & 0 \\ 0 & D''_0 \end{bmatrix}$, $K_0 = \begin{bmatrix} K'_0 & 0 \\ 0 & K''_0 \end{bmatrix} \in R^{3 \times 3}$ はそれぞれ、各ロボットの慣性行列、粘性摩擦行列、剛性行列であり、位置、姿勢に関して完全に非干渉化された行列である。 $F_k^e = \begin{bmatrix} f_k^e & n_k^e \end{bmatrix}^T \in R^3$ は各ロボットに働く力・モーメント、 $F_k^{in} = \begin{bmatrix} f_k^{in} & n_k^{in} \end{bmatrix}^T \in R^3$ は各ロボットによって物体に加えられる内力の目標値、 $\Delta X_k = \begin{bmatrix} \Delta x_k & \Delta \theta_k \end{bmatrix}^T \in R^3$ は各ロボットに働く力・モーメントによる各ロボットの運動誤差である。

$X_{ld} = \begin{bmatrix} x_{ld} & \theta_{ld} \end{bmatrix}^T$, $X_{ie} = \begin{bmatrix} x_{ie} & \theta_{ie} \end{bmatrix}^T \in R^3$ をそれぞれ、リーダーに与えられる目標軌道、 i 番目のフォロワが推定する目標軌道とする。また、 $X_{dl} = \begin{bmatrix} x_{dl} & \theta_{dl} \end{bmatrix}^T$, $X_{ei} = \begin{bmatrix} x_{ei} & \theta_{ei} \end{bmatrix}^T \in R^3$ をそれぞれ、物体の代表点におけるリーダーおよび i 番目のフォロワの目標軌道、 $X = \begin{bmatrix} x & \theta \end{bmatrix}^T \in R^3$ を物体の代表点の実際の軌道とする。

各ロボットが物体をしっかり把持し、各ロボットと物体の間に相対運動が生じないとすると、各ロボットの運動誤差と物体の代表点の運動誤差との間には次式のような関係が成り立つ。

$$\Delta x_k = \Delta x_{ok} - \Delta \theta_{ok} {}^k R^T, \quad \Delta \theta_k = \Delta \theta_{ok} \quad (2)$$

ただし、 $\Delta X_{ok} = \begin{bmatrix} \Delta x_{ok} & \Delta \theta_{ok} \end{bmatrix}^T \in R^3$ は、各ロボットの運動により物体の代表点に生じる運動誤差であり、次式のように表される。

$$\Delta X_{ol} = X - X_{dl} \quad (3)$$

$$\Delta X_{oi} = X - X_{ei} \quad (4)$$

また ${}^k R$ は、各ロボット座標系から物体座標系への並進ベクトル ${}^k r_{cc} = \begin{bmatrix} r_x & r_y \end{bmatrix}^T$ の要素を用いて次式のように定義される。

$${}^k R = \begin{bmatrix} -r_y & r_x \end{bmatrix} \quad (5)$$

以下、議論を簡単にするためにフォロワが1台の場合、すなわち、2台の移動ロボットによる物体の協調搬送問題について考える ($i = 1$)。ここで、操る物体に外力が働かないと仮定すると、物体に加わる力には次式のような関係が成り立つ。

$$F_1^e + F_1^e = 0 \quad (6)$$

$$F_1^{in} + F_1^{in} = 0 \quad (7)$$

式(1),(6),(7)から、定常状態ではリーダとフォロワの運動誤差に次式のような関係が成り立つ。

$$\Delta X_l + \Delta X_f = 0 \quad (8)$$

また、式(2)~(5)から X を消去すると次式が得られる。

$$\Delta X_l - \Delta X_f = X_{dl} - X_{el} \quad (9)$$

物体の代表点におけるリーダの目標軌道 X_{dl} とフォロワの目標軌道 X_{el} の差を ΔX_{dl} とおくと、式(8),(9)から、 ΔX_{dl} は次式のように表される。

$$\Delta X_{dl} = X_{dl} - X_{el} = 2\Delta X_l \quad (10)$$

式(10)から、フォロワは自分自身の運動誤差 ΔX_l を用いて、物体の代表点における推定誤差 ΔX_{dl} を計算することができる。

次に、 ΔX_{dl} からリーダの目標軌道 X_{ld} を推定するために、図3(a)のような伝達関数 G_1 を考える。図3(a)は図3(b)のように等価変換することができるので、フォロワは ΔX_{dl} が零に収束するように、フォロワの目標軌道 X_{le} を定めれば、リーダの目標軌道 X_{ld} を正確に推定することができる。本論文では、定常状態で位置、速度の推定誤差がなく、フォロワの目標軌道をリーダの目標軌道に追従させるため、 G_1 を次式のように設計する。

$$G_1 = \frac{a_1 s + b_1}{s^2} I_3 \quad (11)$$

ただし、 $a_1 > 0$, $b_1 > 0$. I_3 は 3×3 の単位行列である。

2.2 カセンサレスインピーダンス制御 一般に、ロボットを式(1)で表されるインピーダンス特性を満たすように制御するには、カセンサからの力情報を用いるが、本小節ではカセンサからの力情報を用いずにロボットを制御する方法を説明する⁽⁹⁾。

一般に、ホロノミックな移動ロボットの運動方程式は次式で表すことができる。

$$F_k^e + F_k^e = M_k \ddot{X}_k + D_k \dot{X}_k + C_k \overline{\text{sgn}}(g(\dot{X}_k)) \quad (12)$$

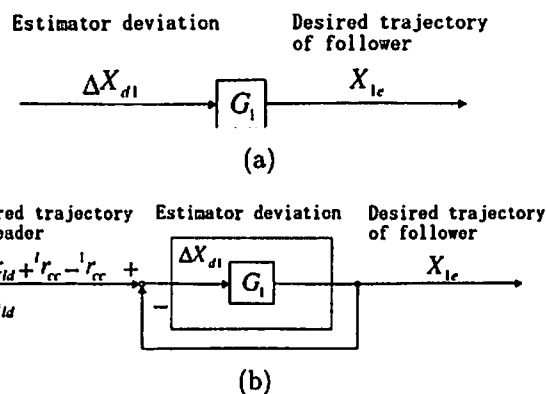


Fig. 3 Estimator

ただし、 $F_k^e \in R^3$ は各ロボットに働く力・モーメント、 $F_k^e \in R^3$ は各ロボットのアクチュエータへの入力トルク $\tau_k^a \in R^n$ によって各ロボットに働く力・モーメントである。また、 $M_k, D_k \in R^{3 \times 3}$ はそれぞれ、各ロボットの実際慣性行列、実粘性行列、 $C_k \in R^{3 \times n}$ は各ロボットの車輪に関するクーロン摩擦行列である。 $X_k \in R^3$ は各ロボットの実際の位置、 $n \in R$ は各ロボットを駆動しているアクチュエータの数である。 $J \in R^{3 \times n}$ を各ロボットの速度 \dot{X}_k と各ロボットの車輪の角速度 $\dot{\theta}_k^w$ を関係づけるヤコビ行列とすると、 $\overline{\text{sgn}}(g(\dot{X}_k))$ は次式のように表される。

$$\overline{\text{sgn}}(g(\dot{X}_k)) = [\text{sgn}(\dot{\theta}_{k1}^w) \quad \text{sgn}(\dot{\theta}_{k2}^w) \quad \dots \quad \text{sgn}(\dot{\theta}_{kn}^w)]^T \quad (13)$$

$$\text{sgn}(\dot{\theta}_k^w) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta}_k^w \geq 0 \\ -1 & \dot{\theta}_k^w < 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$g(\dot{X}_k) = \dot{\theta}_k^w = J^{-1} \dot{X}_k \quad (15)$$

ただし、 $\theta_k^w \in R^n$ は各ロボットの車輪の実際の角度である。また、各ロボットのアクチュエータへの入力トルク τ_k^a とそれにより各ロボットに働く力・モーメント F_k^e の間には、よく知られているように次式の関係が成り立つ。

$$\tau_k^a = J^T F_k^e \quad (16)$$

ここで、各ロボットのアクチュエータに次式に示すような入力トルク τ_k^a を加えることを考える。

$$\begin{aligned} \tau_k^a = & J^T M_k (J \ddot{\theta}_{kd}^w + \dot{J} \dot{\theta}_{kd}^w) \\ & + J^T D_k J \dot{\theta}_k^w + J^T C_k \overline{\text{sgn}}(\dot{\theta}_k^w) - J^T F_k^{in} \\ & + J^T D_0 J (\dot{\theta}_{kd}^w - \dot{\theta}_k^w) + J^T K_0 J (\theta_{kd}^w - \theta_k^w) \end{aligned} \quad (17)$$

ただし、 $\theta_{kd}^w \in R^n$ は各ロボットの車輪の目標角度である。

このとき式(12)~(17)から、各ロボットは次式のようなインピーダンス特性を持つように制御されること

になる。

$$M_k \Delta \ddot{X}_k + D_0 \Delta \dot{X}_k + K_0 \Delta X_k = F_k^e - F_k^{in} \quad (18)$$

この式は式(1)と同様な特性を持ち、かつ文献⁽⁹⁾で提案されている方法と違って加速度フィードバックを用いていないことに注目してほしい。

以上より、各ロボットのアクチュエータに式(17)に示す入力トルク τ_k^e を加えることにより、力センサを用いずに各ロボットを式(18)のインピーダンス特性を満たすように制御することができる。また、各ロボットに第2.1節で説明したリーダー・フォロワタイプの分散協調制御アルゴリズムを適用することにより、力センサを用いずに複数移動ロボットによる物体の協調搬送が実現できる。

3. パラメータ同定誤差

式(17)に含まれている各ロボットのパラメータ M_k , D_k , C_k が正確に同定できれば、各ロボットを式(18)のインピーダンス特性を満たすように制御することができ、第2.1節で説明した分散協調制御アルゴリズムを適用することによって、力センサを用いずに複数移動ロボットにより物体を搬送することができる。しかしながら、一般にパラメータを正確に同定することは難しい。特にクーロン摩擦に関するパラメータは、路面の状態によって変化するため、同定することは困難である。

そこで本節では、パラメータを正確に同定できなかった場合、それが各ロボットの運動にどのように影響するかについて考え、その影響を低減する方法を提案する。

3.1 パラメータ同定誤差による影響 いまパラメータ同定により、各ロボットの実慣性行列 M_k 、実粘性摩擦行列 D_k 、実クーロン摩擦行列 C_k がそれぞれ、 \widehat{M}_k , \widehat{D}_k , \widehat{C}_k と同定されたと仮定する。このとき、各ロボットのアクチュエータへの入力トルクは、式(17)と同様にして、次式のようになる。

$$\begin{aligned} \tau_k^e = & J^T \widehat{M}_k (J \ddot{\theta}_{kd}^w + \dot{J} \dot{\theta}_{kd}^w) \\ & + J^T \widehat{D}_k J \dot{\theta}_k^w + J^T \widehat{C}_k \overline{\text{sgn}}(\dot{\theta}_k^w) - J^T F_k^{in} \\ & + J^T D_0 J (\dot{\theta}_{kd}^w - \dot{\theta}_k^w) + J^T K_0 J (\theta_{kd}^w - \theta_k^w) \end{aligned} \quad (19)$$

このとき式(12)~(16),(19)から、各ロボットは次式のようなインピーダンス特性を持つように制御されることになる。

$$\begin{aligned} F_k^e - F_k^{in} + F_k^p \\ = M_k \Delta \ddot{X}_k + D_0 \Delta \dot{X}_k + K_0 \Delta X_k \end{aligned} \quad (20)$$

ただし、 $F_k^p \in R^3$ はパラメータ同定誤差により各ロボットに等価的に働く力・モーメントである。今後の説明のために、この力 F_k^p を等価外力と呼ぶことにする。このとき、この等価外力 F_k^p は次式のように表される。

$$F_k^p = \Delta M_k \ddot{X}_{kd} + \Delta D_k \dot{X}_k + \Delta C_k \text{sgn}(\dot{X}_k) \quad (21)$$

ただし、 ΔM_k , $\Delta D_k \in R^{3 \times 3}$, $\Delta C_k \in R^{3 \times n}$ はそれぞれ、各ロボットの慣性行列に関するパラメータ誤差 $\widehat{M}_k - M_k$ 、粘性摩擦行列に関するパラメータ誤差 $\widehat{D}_k - D_k$ 、クーロン摩擦行列に関するパラメータ誤差 $\widehat{C}_k - C_k$ である。

第2.1節で説明した分散協調制御アルゴリズムは物体に外力が働かないという仮定のもとで成り立つ。しかし、パラメータ同定誤差により各ロボットに等価外力 F_k^p が働くと、これによって物体にも等価的に外力が働いてしまう。従って、物体に外力が働かないという仮定が成り立たなくなり、この分散協調制御アルゴリズムを用いることができなくなる。

3.2 等価外力の影響の低減法 本小節では、文献⁽¹⁰⁾で提案されているアルゴリズムを拡張することにより、等価外力の影響を低減する方法、すなわち、パラメータを正確に同定できなかった場合でも、力センサを用いずに複数移動ロボットにより物体を協調搬送することができる協調制御アルゴリズムを提案する。

ここでも、説明を簡単にするためにフォロワが1台の場合、すなわち、2台の移動ロボットによる物体の協調搬送について考える ($i=1$)。ロボットシステム全体で考えると、各ロボットに働く等価外力は、自分自身の等価外力 $F_k^p \in R^3$ と、他のロボットの等価外力により働く力・モーメント $\widehat{F}_k^p \in R^3$ の合力と考えることができる。そこで、システム全体で考えた場合の各ロボットに働く等価外力を $F_k^{ext} \in R^3$ とおくと、 F_k^{ext} は次式のように表される。

$$F_k^{ext} = F_k^p + \widehat{F}_k^p \quad (22)$$

また、 ΔX_i^{ext} , $\Delta \dot{X}_i^{ext} \in R^3$ を、各ロボットに働く等価外力 F_i^{ext} , F_1^{ext} によって各ロボットに生じる運動誤差とすると、次式の関係が成り立つ。

$$M_1 \Delta \ddot{X}_1^{ext} + D_0 \Delta \dot{X}_1^{ext} + K_0 \Delta X_1^{ext} = F_1^{ext} \quad (23)$$

$$M_1 \Delta \ddot{X}_1^{ext} + D_0 \Delta \dot{X}_1^{ext} + K_0 \Delta X_1^{ext} = F_1^{ext} \quad (24)$$

式(1)から式(23),(24)を辺々引くと、次式の関係が得られる。

$$M_1 (\Delta \ddot{X}_1 - \Delta \ddot{X}_1^{ext}) + D_0 (\Delta \dot{X}_1 - \Delta \dot{X}_1^{ext})$$

$$\begin{aligned}
 &+ K_0(\Delta X_l - \Delta X_l^{ext}) = (F_l^e - F_l^{ext}) - F_l^{in} \quad (25) \\
 M_1(\Delta \ddot{X}_1 - \Delta \ddot{X}_1^{ext}) + D_0(\Delta \dot{X}_1 - \Delta \dot{X}_1^{ext}) \\
 &+ K_0(\Delta X_1 - \Delta X_1^{ext}) = (F_1^e - F_1^{ext}) - F_1^{in} \quad (26)
 \end{aligned}$$

式(25),(26)は、パラメータ同定誤差により各ロボットに働く等価外力の影響を取り除いた各ロボットの特性を表す。このとき、式(8)と同様に次式が成り立つ。

$$(\Delta X_l - \Delta X_l^{ext}) + (\Delta X_1 - \Delta X_1^{ext}) = 0 \quad (27)$$

また、式(2)からパラメータ同定誤差により各ロボットに働く等価外力の影響を取り除くと、次式の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 \Delta x_k - \Delta x_k^{ext} &= (\Delta x_{ok} - \Delta x_{ok}^{ext}) \\
 &\quad - (\Delta \theta_{ok} - \Delta \theta_{ok}^{ext})^k R^T \quad (28)
 \end{aligned}$$

$$\Delta \theta_k - \Delta \theta_k^{ext} = \Delta \theta_{ok} - \Delta \theta_{ok}^{ext} \quad (29)$$

ただし、 $\Delta X_{ok}^{ext} = \begin{bmatrix} \Delta x_{ok}^{ext} & \Delta \theta_{ok}^{ext} \end{bmatrix}^T \in R^3$ は、各ロボットに働く等価外力 F_k^{ext} によって物体の代表点に生じる各ロボットの運動誤差である。このとき文献⁽¹⁰⁾から、 ΔX_{ok}^{ext} には次のような関係が成り立つ。

$$\Delta X_{ol}^{ext} = \Delta X_{o1}^{ext} \quad (30)$$

ここで物体の代表点が各ロボットによって構成されるシステムの重心にあるとすると、次式のような関係が成り立つ。

$${}^l R^T = -{}^1 R^T \quad (31)$$

また、式(27)と同様に、物体の代表点の運動誤差に関して次式のような関係が成り立つ。

$$(\Delta X_{ol} - \Delta X_{ol}^{ext}) + (\Delta X_{o1} - \Delta X_{o1}^{ext}) = 0 \quad (32)$$

式(27)~(32)から、式(10)と同様に次式のような関係が得られる。

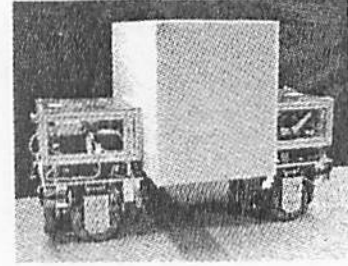
$$\Delta X_{d1} = X_{d1} - X_{e1} = 2(\Delta X_1 - \Delta X_1^{ext}) \quad (33)$$

式(33)はパラメータ同定誤差により働く等価外力の影響を取り除いた推定誤差を表す。従って、式(10)の代わりに式(33)を用いることによって、フォロワはパラメータ同定誤差により働く等価外力の影響を低減しながら、リーダに与えられた目標軌道を推定することができる。

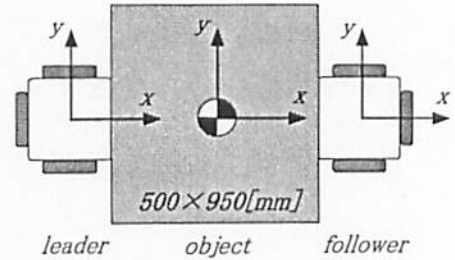
式(33)に含まれる ΔX_1 はフォロワ自身の情報だけで計算できるので、次に ΔX_1^{ext} を計算する方法について考える。

まず式(30),(32)から、次式が得られる。

$$\Delta X_{o1}^{ext} = (\Delta X_{ol} + \Delta X_{o1})/2 \quad (34)$$



(a) Appearance



(b) Coordinate system

Fig. 4 Experimental system

さらに式(2),(3),(4),(34)から、 ΔX_1^{ext} は次式のように表される。

$$\Delta X_1^{ext} = \begin{bmatrix} \Delta x_{o1}^{ext} - \Delta \theta_{o1}^{ext} {}^1 R^T & \Delta \theta_{o1}^{ext} \end{bmatrix}^T \quad (35)$$

ただし、

$$\Delta x_{o1}^{ext} = x - (x_{d1} + x_{e1})/2 \quad (36)$$

$$\Delta \theta_{o1}^{ext} = \theta - (\theta_{d1} + \theta_{e1})/2 \quad (37)$$

ここで、リーダは自分自身の情報からリーダの目標軌道 $X_{d1} = \begin{bmatrix} x_{d1} & \theta_{d1} \end{bmatrix}^T$ を計算することができる。また文献⁽¹⁰⁾より、リーダは物体の代表点の現在位置・姿勢からフォロワの目標軌道 $X_{e1} = \begin{bmatrix} x_{e1} & \theta_{e1} \end{bmatrix}^T$ を計算することができる。そのため、リーダは式(35)~(37)から、 ΔX_1^{ext} を計算することができる。従って、リーダが ΔX_1^{ext} を計算し、フォロワにブロードキャストすることにより、フォロワは式(33)を用いて、推定誤差 ΔX_{d1} を計算することができる。ただし、パラメータ同定誤差により各ロボットに働く等価外力は滑らかに変化すると仮定できるので、通常、外力情報のブロードキャストは制御系のサンプリング周期とは別の遅い周期で行えば十分である。

以上より、フォロワは推定誤差 ΔX_{d1} を計算し、第2.1節で設計した伝達関数行列 G_1 を用いることにより、パラメータ同定誤差により働く等価外力の影響を低減しながら、リーダの目標軌道を推定することができる。

第2.1節、第3節で提案してきた分散協調制御アルゴリズムは、文献⁽⁸⁾で提案されている仮想リーダの概

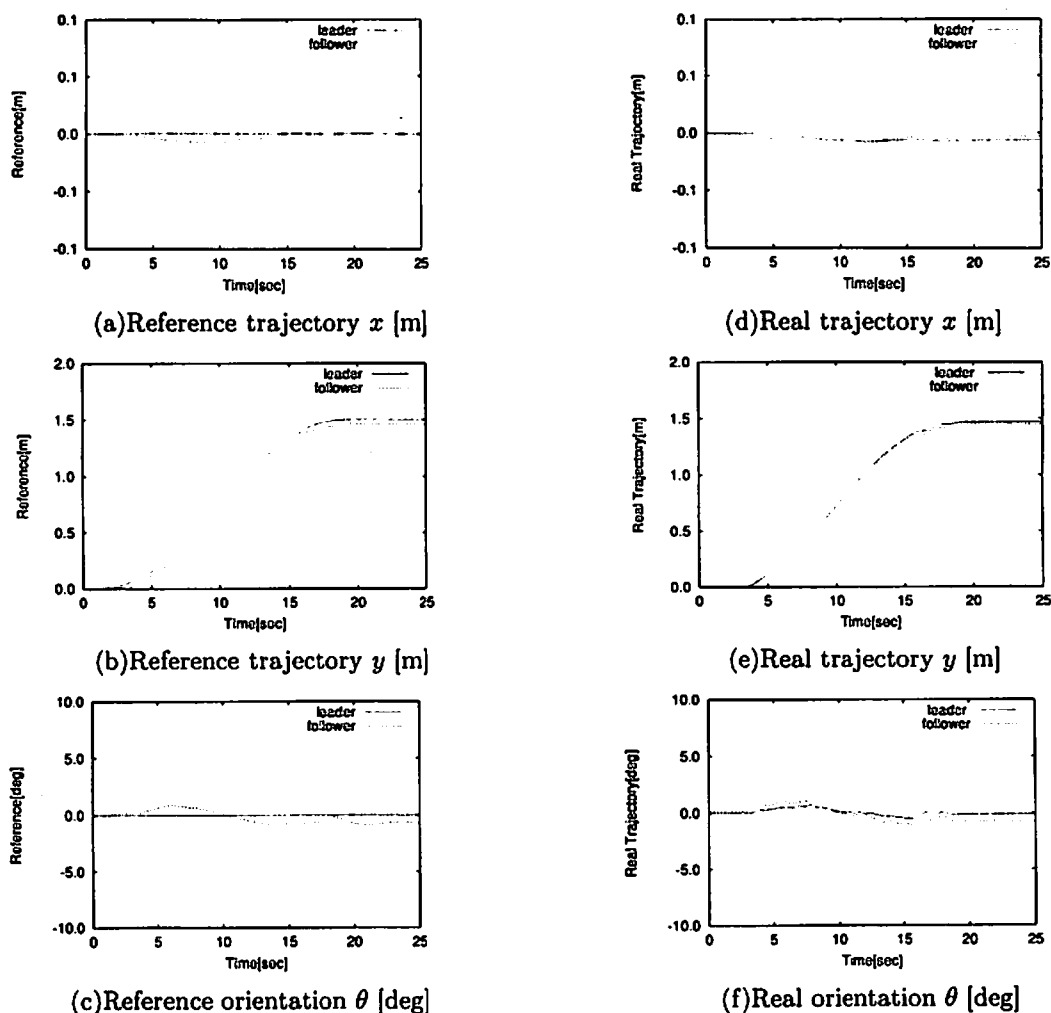


Fig. 5 Experimental results

念を用いることにより、3台以上の移動ロボットの場
合に容易に拡張することができる。従って、3台以上
の移動ロボットによる物体の協調搬送においても、力
センサを用いずに実現することができる。

4. 実 験

本研究で提案したアルゴリズムの有効性を示すた
めに、提案したアルゴリズムを2台の全方向移動ロ
ボットに適用し搬送実験を行った。実験には図4に示
す理化学研究所によって開発された全方向移動ロボ
ットZENを用いて行った。はじめに入出力関係からパ
ラメータ同定を行い、ロボットのパラメータである実
慣性行列 M_k 、実粘性摩擦行列 D_k 、実クーロン摩擦
行列 C_k を同定し、その同定結果を用いて搬送実験を
行った。

実験では、リーダーに0[m]から1.5[m]を20[s]で移動
するという5次関数で生成した目標軌道を与え、フォ
ロワは提案したアルゴリズムにより、パラメータ同定

誤差により働く等価外力の影響を低減しながら、リー
ダの目標軌道を推定し、リーダーと協調して物体を搬
送させた。実験結果を図5に示す。図5より、フォロ
ワはリーダーに与えられた目標軌道をほぼ正確に推定
し、リーダーとともに物体を協調して搬送しているこ
とがわかる。ただし、今回の実験では制御系のサンプ
リング周期を1[msec]とし、リーダーは100[msec]ごと
に ΔX_1^{ext} を、フォロワにブロードキャストした。

また、図6に示すような目標軌道に基づいて、実験
の一例を行った。その結果を図7に示す。これより、
2台のロボットが協調して、力センサを用いずにうまく
搬送作業を実現しているのがわかる。

5. 結 言

本研究では、力センサを用いずに、複数台のホロノ
ミックな移動ロボットにより単一物体の搬送を実現す
るための協調制御アルゴリズムを提案した。また、提
案したアルゴリズムを2台の全方向移動ロボットに適

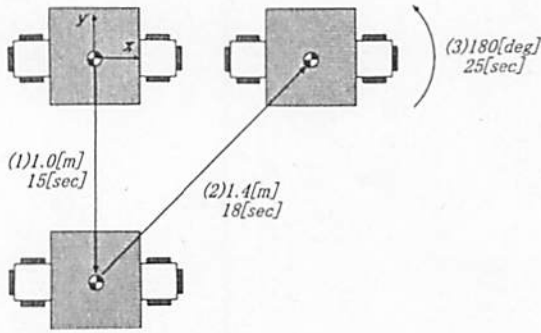


Fig. 6 Desired trajectory of a experiment

用し、実験によりその有効性を示した。

なお、本研究の一部は、平成 13 年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (A)(2)(12305028) の援助を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

References

- (1) E.Nakano, S.Ozaki, T.Ishida, I.Kato, "Cooperational Control of the Anthropomorphic Manipulator "MELARM"", *Proc. of 4th International Symposium on Industrial Robots*, pp.251-260, Tokyo 1974.
- (2) M.Uchiyama, "A Unified Approach to Load Sharing, Motion Decomposing and Force Sensing of Dual Arm Robots", *Robotic Research, The Fifth International Symposium*, pp.225-232, MIT Press, 1990.
- (3) 小菅, 吉田, 福田, 蟹谷, 酒井, 鈴木, "インピーダンス制御に基づく双腕マニピュレータの協調制御", 日本ロボット学会, Vol.13, No.3, pp.404-410, 1995
- (4) O.Khatib, K.Yokoi, O.Brock, K.Chang, and A.Casal, "Robots in Human Environments: Basic Autonomous Capabilities", *Int. Journal of Robotics Research*, pp.684-696, 1999.
- (5) W.B.Gevarter, "Basic Relations for Control of Flexible Vehicles", *AIAA JOURNAL*, Vol.8, No.4, pp.666-672, 1970.
- (6) R.H.Cannon, E.Schmits, "Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot", *International Journal of Robotics Research*, Vol.3, No.3, pp.62-75, 1984.
- (7) K.Kosuge, T.Oosumi, "Decentralized Control of Multiple Robots Handling an Object", *Proc. of 1996 IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.318-323, 1996.
- (8) 平田, 小菅, 浅間, 嘉悦, 川端, "複数移動ロボットによる大型物体の協調ハンドリング", 日本機械学会論文集中 (C 編), 67 巻, 656 号, pp.1077-1084, 2001
- (9) 館, 榊, 荒井, 西澤, ベラエス・ポロ, "力センサを用いないダイレクト・ドライブ・マニピュレータのインピーダンス制御", 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.3, pp.60-72, 1989
- (10) K.Kosuge, T.Oosumi, K.Chiba, "Load Sharing of Decentralized-Control Multiple Mobile Robots Handling a Single Object", *Proc. of 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automations*, pp.3373-3378, 1997.

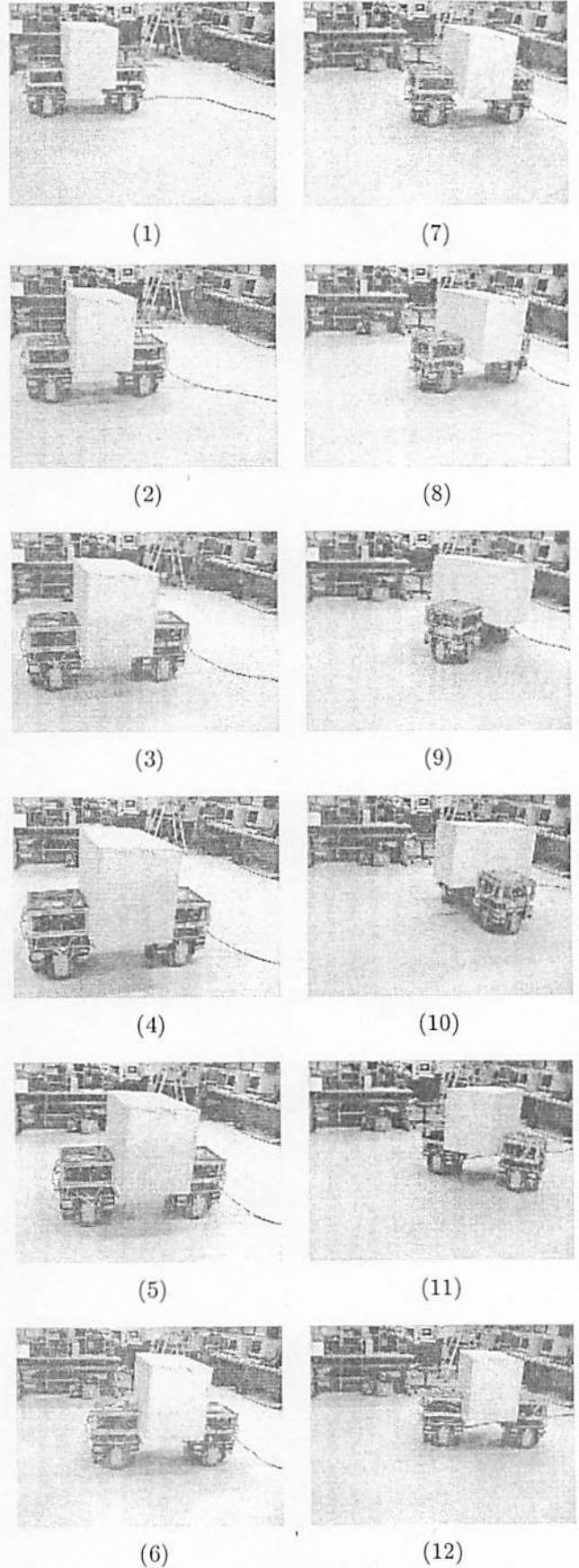


Fig. 7 Experimental results of Fig. 6